aci avances en ciencias e ingenierías

Artículo/Article
Sección B/Section B
**Vol. 15, nro. 2**
e2931

# Índice de calidad de aguas subterráneas en la región centro oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina

**Carina Griffa[1*], Rosana Boglione[1], María Cecilia Panigatti[1], Jorge Martín Meichtry[2], María Celeste Schierano[1], Melina Asforno[1].**

[1]Grupo GEM (Grupo de Estudios de Medio Ambiente). Facultad Regional Rafaela.Universidad Tecnológica Nacional. Acuña 49. Rafaela, Argentina.

[2]Centro de Tecnologías Químicas, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, Buenos Aires, Argentina.

*Autor para correspondencia/Corresponding author: labquimicautn@gmail.com

# Groundwater quality index in central west region of Santa Fe province, Argentina

## Resumen

El suministro de agua es indispensable para cubrir las necesidades de uso de la población y fomentar el desarrollo económico. No obstante, los acuíferos están expuestos a una creciente problemática de agotamiento y contaminación. Para evaluar el estado del agua, se utiliza un Índice de Calidad que toma en cuenta múltiples parámetros físicos, químicos y biológicos, y se plasman en una fórmula matemática y en un periodo establecido. Además, este índice posibilita la realización de un análisis global de la calidad del agua y la evaluación de su susceptibilidad ante eventuales riesgos de contaminación. El objetivo de la presente investigación consiste en examinar la calidad del agua subterránea en la zona centro oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina, empleando un Índice de Calidad (ICA) que refleje su estado. Durante los años 2021 y 2022, se efectuaron muestreos y se caracterizaron fisicoquímicamente las aguas extraídas en diferentes puntos del área en estudio. Para el cálculo del ICA, se utilizaron 7 parámetros fisicoquímicos, a los que se les otorgó una valoración acorde con su importancia relativa en la calidad del recurso y en función de los efectos perjudiciales en la salud humana. A través del cálculo del ICA se la puede clasificar en términos de su aptitud para el consumo humano, según las categorías de excelente, buena, pobre, muy pobre y no apta. Se obtuvieron resultados que evidenciaron que el mayor porcentaje de muestras estudiadas se encuentra dentro de la clasificación muy pobre y no apta para consumo humano. El ICA demostró que, en general, es aceptable la calidad química del agua subterránea de la región centro oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina, con fines de abastecimiento. Por lo tanto, resultaría útil el diseño de un cronograma de monitoreo para identificar las variaciones en la calidad del agua y llevar a cabo medidas que mitiguen los riesgos de contaminación.

**Palabras clave:** Calidad aguas, agua subterránea, salud humana, sales, arsénico, nitratos.

## Abstract

Water supply is essential to meet population requirements and promote economic development. However, aquifers are increasingly facing depletion and contamination.

OPEN ACCESS

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

**Editado por / Edited by:** Fernando Nicolás Vela

**Recibido / Received:** 13/06/2023

**Aceptado / Accepted:** 27/07/2023

**Publicado en línea / Published online:** 18/10/2023

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

An index that considers multiple physical, chemical and biological parameters is used to assess water quality through the application of a mathematical formula. This index also enables a comprehensive analysis of water quality and assesses their potential contamination risks. The objective of this research is to evaluate groundwater quality in the central-western zone of Santa Fe province, Argentina, using a quality index (WQI) that shows its state. Sampling was carried out during the years 2021 and 2022, and waters samples were characterized physically and chemically. Seven physicochemical parameters were used to calculate the WQI, and a value was assigned to each parameter according to its relative importance on resource quality and its harmful effects on human health. This way, the WQI is calculated, and classified in terms of its suitability for human consumption, according to the categories: excellent, good, poor, very poor, and not suitable. The results revealed that the highest percentage of samples studied fell within the "very poor" and "not suitable for human consumption" classification. The WQI demonstrated that, chemical quality of groundwater in the evaluated region is acceptable for supply purposes. Therefore, it would be useful to design a monitoring schedule to identify variations in water quality and implement measures to mitigate contamination risks.

**Key words:** Quality water, groundwater, human health, salts, arsenic, nitrates.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado considerablemente el interés general en la preservación de la calidad del ambiente debido a la necesidad de garantizar la disponibilidad de los recursos naturales para las próximas generaciones. El agua es un componente de los ecosistemas naturales fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta porque resulta indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos y geoquímicos. Además, es imprescindible para la vida del ser humano, reconociendo la Organización de las Naciones Unidas (Resolución 64/292) la existencia del derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que el agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. Además, el agua es un factor estratégico en la definición de asentamientos humanos, ya que es un recurso primordial en las actividades económicas y productivas del hombre y es determinante de la evolución socioambiental. En el caso particular de las aguas subterráneas, que en algunos lugares constituyen la única fuente de abastecimiento, se requiere una detección temprana de las posibles contaminaciones para paliar el deterioro que puedan provocar del recurso hídrico [1, 2]. Por lo tanto, conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas de los recursos hídricos subterráneos tiene un papel importante para definir si es factible su utilización [3-6].

En la República Argentina existen comunidades pequeñas o zonas rurales que se abastecen con agua subterránea ya que es la única fuente de aprovisionamiento de este recurso y la mayoría de la población consume agua cuyas características desconoce [1]. Por lo tanto, para determinar si es factible su uso como fuente de suministro, es necesario efectuar un diagnóstico de sus características. El Índice de Calidad de agua (ICA) es un método para determinar la calidad del agua, tanto subterránea como superficial, y

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

es considerado un indicador ambiental que permite un conocimiento general de su composición [7, 8]. El ICA se puede utilizar para la zonificación cualitativa de los acuíferos para consumo y también para determinar las ubicaciones ideales para pozos de agua potable [7]. La utilización de los índices de calidad de agua permite orientar la evaluación desde distintas perspectivas, no solo para consumo humano, sino también para su uso en otras actividades, como industriales o agrícolas, entre otras. En cuanto a su utilización para consumo humano, es importante incluir componentes químicos que presenten un elevado riesgo para la salud, de tal modo que el valor final de los índices de calidad de las aguas subterráneas sea representativo y no presente errores respecto de clasificar como buena o excelente un agua que no lo es [9].

El primer Índice de Calidad de agua fue propuesto por Horton [10] y fue relevante ya que permitió que otros investigadores contribuyan con su desarrollo. Es el caso de Brown et al. [11], quienes asignaron un peso adecuado a los parámetros en función de las características del agua. Posteriormente, se han utilizado varios métodos aritméticos para seleccionar parámetros y calcular índices de calidad de agua [7, 9, 12-14]. Para seleccionar los parámetros incluidos en el ICA, se deben tener en cuenta las condiciones hidrogeológicas, el clima, el uso del suelo, las influencias antropogénicas y el uso de los recursos hídricos [4, 15]. Además, esta selección de variables requiere un proceso de análisis y ponderación, según las características generales del agua que se evalúa [9, 16, 17].

Debido a las condiciones hidrogeológicas locales, una extensa zona de la República Argentina, que se extiende desde la frontera con Paraguay al Norte hasta la Meseta Patagónica al Sur y desde las Sierras Pampeanas por el Oeste hasta los ríos Paraná y de la Plata por el Este; se encuentra afectada por la presencia de altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas [18-20]. La región en estudio se encuentra comprendida dentro del área mencionada.

Las altas concentraciones de nitrato en las aguas también son una preocupación a nivel mundial debido a que este contaminante constituye un factor de riesgo para la salud humana, principalmente para los niños pequeños y lactantes. Su presencia puede estar asociada a diversas fuentes ya sean puntuales, como las actividades industriales y urbanas (vertidos de líquidos residuales, cámaras sépticas y lixiviados de residuos sólidos) o difusas, como la actividad agrícola [21-23].

En concordancia con lo expuesto, se desarrolla el presente estudio con el objetivo de evaluar la calidad del agua subterránea en la región centro oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina, empleando un Índice de Calidad del agua que sea representativo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

En este estudio, realizado en la zona centro occidental de la provincia de Santa Fe, Argentina, se extrajeron muestras de agua en diferentes perforaciones, las cuales se georreferenciaron utilizando un GPS Garmin Nüvi 30. La temperatura media anual varía entre 12,2 y 26,3 ºC y la precipitación media anual se encuentra entre 21,6 y 149,4 mm

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

[24]. En la Figura 1, se presenta el mapa hidrológico de la República Argentina y se delimita la región en estudio. Como se puede observar, la zona no posee recursos de agua superficial y cuenta con dos ciudades importantes; Rafaela con 109.000 habitantes y Sunchales con 21.304 habitantes. Además, tiene una gran cantidad de poblaciones con menos de 10.000 habitantes [25]. En las localidades más pobladas de la región hay una gran cantidad de industrias: metalmecánicas, productoras y procesadoras de alimentos, de envases, etc. Esta zona es una de las principales cuencas lecheras de la República Argentina ya que cuenta con un gran número de tambos y se realiza cría de ganado bovino junto con actividades agrícolas.

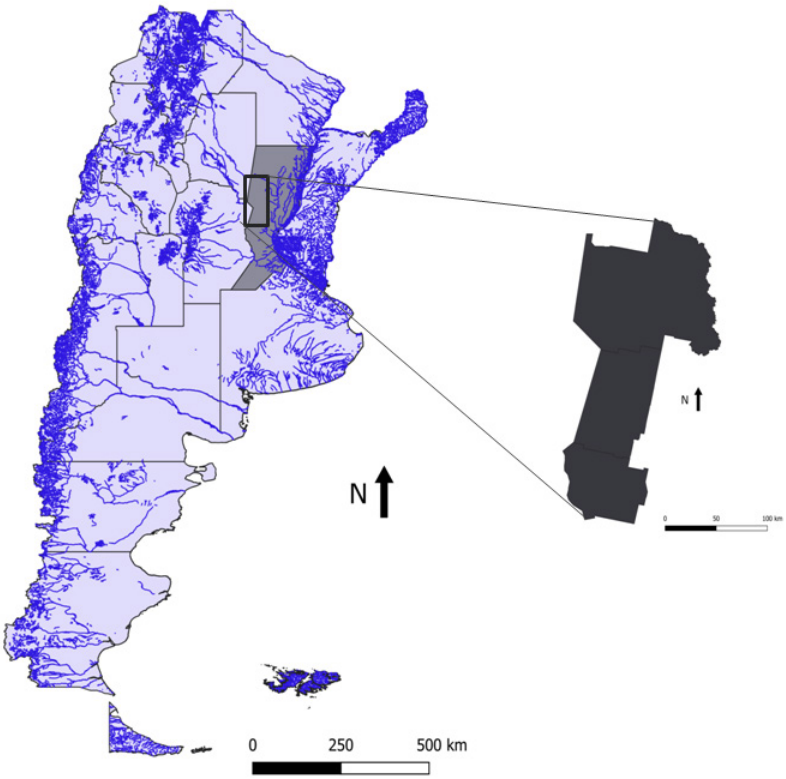


**Figura 1.** Localización del área de estudio

Se tomaron muestras de aguas subterráneas en 250 puntos localizados en diferentes lugares de la región de estudio entre los años 2021 y 2022. Luego de su extracción, las muestras se almacenaron en botellas de polietileno [26], se etiquetaron y almacenaron a 4 °C hasta los análisis de laboratorio. De acuerdo con la metodología propuesta por Standard Methods (SM), APHA [26], se efectuaron los siguientes ensayos: pH (SM 4500-$H^+$ B), sólidos totales (SM 2540 B), dureza total (SM 2340 C), cloruros (SM 4500-$Cl^-$ B), sulfatos (SM 4500-$SO_4^{-2}$ E), nitratos (SM 4500- $NO_3^-$ C), arsénico (SM 3114 C).

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

## Índices de calidad de agua (ICA)

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con características adecuadas es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas. Para determinar si el agua para consumo humano se encuentra entre estos límites, se compararon las características del agua con los límites permisibles establecidos por el Código Alimentario Argentino (C.A.A.) [27].

En estudios previos, se caracterizaron aguas subterráneas del área bajo estudio [28] y se identificaron parámetros críticos que podrían tener efectos adversos sobre la salud humana para incluirlos en el cálculo del ICA. Se seleccionaron 7 parámetros fisicoquímicos: pH, sólidos totales (ST), dureza total, cloruros ($Cl^-$), sulfatos ($SO_4^{2-}$), nitratos ($NO_3^-$) y arsénico (As) y se realizaron 4 pasos para el cálculo correspondiente.

En el primer paso, se estableció una ponderación para cada parámetro ($w_i$), utilizando valores que varían entre uno y cinco (1 menor riesgo – 5 mayor riesgo), de acuerdo con su relevancia en la calidad del agua para consumo humano y con las condiciones hidrogeológicas del área en estudio [9, 28].

En la segunda etapa se calculó el peso relativo ($W_i$) de cada parámetro de acuerdo con la ecuación del método del peso aritmético [10, 11]:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{1}$$

$W_i$ = peso relativo
$w_i$ = peso de cada parámetro (Tabla 1)
$n$ = número de parámetros

En la Tabla 1, se resumen las variables seleccionadas con las correspondientes ponderaciones asignadas ($w_i$) y el peso relativo ($W_i$) de cada parámetro. También se pueden visualizar los valores de $S_i$, el cual establece el límite máximo permitido para consumo humano de cada parámetro según lo establecido por el C.A.A. (2019) [27].

**Tabla 1.** Variables empleadas para el cálculo del Índice de Calidad de agua subterránea con sus correspondientes límites permitidos y pesos relativos

| Parámetro | Peso de cada parámetro $w_i$ | Peso relativo $W_i$ | Límite máximo permitido (mg/L) $S_i$ |
|---|---|---|---|
| pH | 1 | 0,04 | 7,50 |
| Sólidos totales (mg/L) | 5 | 0,19 | 1500 |
| Dureza total (mg) $CaCO_3$/L) | 3 | 0,12 | 400 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 4 | 0,15 | 350 |
| Sulfatos (mg $SO_4^{-2}$/L) | 3 | 0,12 | 400 |
| Nitrato (mg $NO_3^-$/L) | 5 | 0,19 | 45 |
| As (mg As/L) | 5 | 0,19 | 0,01 |


DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

En el siguiente paso, se estableció una escala de valoración de la calidad para cada variable ($q_i$), realizando el cociente entre la concentración resultante de cada muestra de agua y su valor máximo permitido ($S_i$) y el resultado obtenido fue multiplicado por 100:

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \tag{2}$$

$q_i$ = calificación de la calidad
$C_i$ = concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en mg/L
$S_i$ = límite máximo permitido en mg/L (C.A.A., 2019) [23]

Finalmente, para calcular el ICA se halló el $SI_i$: w

$$Sl_i = W_i \times q_i \tag{3}$$

$SI_i$ = subíndice de cada parámetro

Se sumaron los valores $SI_i$ de todas las variables en la siguiente ecuación:

$$ICA = \sum S\,l_i \tag{4}$$

ICA = Índice de Calidad del agua

El resultado obtenido es un número que se utiliza para clasificar la idoneidad del agua para consumo humano en cinco categorías: excelente, buena, pobre, muy pobre y no apta para consumo humano en cada punto de muestreo, como se presenta en la Tabla 2 [9, 29-31].

**Tabla 2.** Clasificación de muestras de agua según el valor de ICA

| Valor de ICA | Calidad del agua |
|---|---|
| Menor de 50 | Excelente |
| De 50 a 100 | Buena |
| De 100 a 200 | Pobre |
| De 200 a 300 | Muy pobre |
| Mayor de 300 | No apta para consumo humano |

Los valores de ICA correspondientes a cada pozo monitoreado fueron localizados en el mapa del área en estudio, utilizando el software de Sistema de Información Geográfica QGIS e integrando la información correspondiente a la calidad del agua con su ubicación.


DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3, se observan los valores mínimos y máximos de cada parámetro y el promedio, considerando las 250 muestras analizadas. Se incluyó también el porcentaje de pozos analizados que superan los límites permitidos por el C.A.A. (2019) [27].

**Tabla 3.** Valores mínimos, máximos, medios y porcentaje de pozos analizados que no cumplen con el C.A.A.

| Parámetros | Mínimo | Máximo | Límite máximo (C.A.A.) | Porcentaje no cumplimiento (%) |
|---|---|---|---|---|
| pH | 6,78 | 8,92 | 6,50-8,50 | 7,7 |
| Sólidos totales (mg/L) | 431,0 | 6952,0 | 1500 | 59,0 |
| Dureza total (mg $CaCO_3$/L) | 24,8 | 1821,5 | 400 | 3,4 |
| Cloruros (mg $Cl^-$/L) | 13,6 | 2565,9 | 350 | 17,1 |
| Sulfatos (mg $SO_4^{-2}$/L) | 28,5 | 2616,7 | 400 | 28,2 |
| Nitrato (mg $NO_3^-$/L) | 7,1 | 739,5 | 45 | 67,1 |
| Arsénico (mg As/L) | 0,009 | 2,00 | 0,01 | 95,3 |

Para calcular el ICA de cada muestra analizada, se asignó un peso distinto a cada uno de los parámetros analizados en función de los efectos perjudiciales para la salud humana [9, 16, 17]. Por lo tanto, para los sólidos totales disueltos, nitratos y arsénico, se dio un valor de 5. Para los cloruros la ponderación fue de 4, para la dureza total y sulfato fue de 3, mientras que se asignó un valor de 1 para los valores de pH.

Luego de realizar los cálculos correspondientes se determinó el Índice de Calidad de Agua en cada uno de los pozos de muestreo. De acuerdo con la clasificación presentada en la Tabla 2, se calcularon los porcentajes de muestras de cada rango y los valores resultantes se observan en la Figura 2. El 1% de las aguas analizadas posee calidad excelente, el 6% corresponden a aguas buenas y el 26% para agua considerada pobre. El mayor porcentaje calculado (39%) coincide con la clasificación de muy pobre, mientras que 28% de las aguas se consideran no aptas para el consumo humano.

El elevado porcentaje obtenido de aguas muy pobres o no aptas para consumo humano (67% del total) se debe principalmente a que la mayor cantidad de porcentajes de no cumplimiento con los requisitos del C.A.A. se obtiene para sólidos totales, nitratos y arsénico, parámetros de mayor peso dentro del cálculo de ICA.


DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

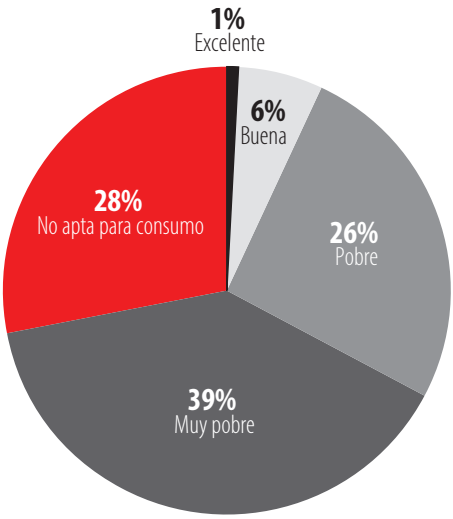


**Figura 2.** Porcentajes de muestras de cada rango de clasificación en aguas subterráneas de la zona en estudio

Un porcentaje superior al 90% de las muestras analizadas tuvieron valores de pH entre 6,5 y 8,5, rango establecido por el C.A.A. para consumo humano (2019) [27] (Tabla 3).

Tanto la composición como la concentración iónica presente en el agua subterránea varían de acuerdo a las características geológicas del suelo y del agua que se filtra en el mismo. En las muestras estudiadas, el promedio de sólidos totales (2057 mg/L) es superior al permitido por el C.A.A. (1500 mg/L) (Tabla 3). El flujo del agua en el subsuelo es sumamente lento en comparación con la velocidad del agua en superficie. La extrema lentitud del flujo permite que se origine en ciertos acuíferos una estratificación de la concentración de las sales disueltas [32].

Con respecto a la dureza total, el agua subterránea se clasifica en: muy blanda (0-75 mg/L), blanda (75-150 mg/L), moderadamente dura (150-300 mg/L), dura (300-450 mg/L) y muy dura (>450 mg/L) [33]. Los valores de dureza total variaron desde 24,8 hasta 1821,5 mg/L con un promedio de 229,1 mg/L, donde el 10,5% de las aguas se consideran duras y el 7,3% muy duras. El 96,6 % de las aguas analizadas cumplen con el límite de potabilidad establecido por el C.A.A.

En lo que respecta al sulfato, la concentración media (415,5 mg $SO_4^=$/L) es superior al límite del C.A.A. (400 mg/L). Considerando todas las muestras analizadas, sólo el 28,2 % supera dicho límite (Tabla 3). Este anión suele encontrarse en forma de sales solubles de sodio y magnesio. Si el agua destinada para el consumo humano contiene altas concentraciones de sulfato, puede provocar deshidratación en los consumidores. Además, niveles altos de sulfato pueden tener un efecto laxante, especialmente en los niños [34].

En cuanto al cloruro, es un ion altamente móvil que se encuentra comúnmente en las aguas naturales y contribuye a la salinidad de las mismas. Un porcentaje superior al 80% de

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

las muestras analizadas posee concentraciones de cloruro inferiores al límite determinado por el C.A.A. (350 mg $Cl^-$/L) (Tabla 3). Los pozos con concentraciones de cloruros superiores a 350 mg $Cl^-$/L, poseen altas concentraciones de nitratos, por lo que la contaminación de estas aguas subterráneas podría estar vinculada con actividades agrícolas [35, 36].

En cuanto a la presencia del ion nitrato, aguas con concentraciones superiores a 45 mg $NO_3^-$/L no se consideran adecuadas para consumo humano. La contaminación por nitratos ocurre ampliamente en las áreas rurales y urbanas, ya sea por el uso intensivo de fertilizantes en agricultura y/o por las descargas de aguas residuales sin tratamiento adecuado [3]. En esta investigación, se encontraron concentraciones variables, con valores que oscilaron entre 7,1 y 739,5 mg $NO_3^-$/L. Un 67,1 % de las muestras analizadas arrojaron valores por encima de este límite (Tabla 3). Esta amplitud en el rango de valores medidos podría deberse a la presencia de factores antropogénicos, como la cercanía a pozos negros o el desarrollo de actividades agrícola-ganaderas en las inmediaciones de los puntos de monitoreo [37, 38].

El ion nitrato suele ser indicador de contaminación orgánica debido a la presencia de estiércol en suelos y su posterior infiltración en las aguas subterráneas [39] como así también debido al uso excesivo de fertilizantes conteniendo urea [40, 41]. Su presencia asociada a procesos naturales se podría relacionar con las precipitaciones, la meteorización de minerales y la descomposición de la materia orgánica. Debido a su naturaleza soluble, los nitratos tienden a desplazarse grandes distancias en la subsuperficie, particularmente en sedimentos altamente permeables [42, 43].

En cuanto al arsénico, uno de los principales contaminantes del agua subterránea en el área en estudio, en un porcentaje superior al 95% de los casos estudiados se hallaron concentraciones que superan el límite recomendado por el C.A.A. de 0,01 mg As/L. Su presencia se debe a la meteorización de minerales de origen volcánico, así como a las condiciones fisicoquímicas del agua que facilitan su desplazamiento [20, 44]. En esta zona los sedimentos conformados por cenizas volcánicas de origen eólico tienen alto contenido de arsénico y la población que consume agua con elevados niveles de este metaloide puede sufrir las consecuencias de diversas enfermedades, una de ellas es el Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) [20, 45, 46].

En la Figura 3 se presenta el mapa con los puntos de muestreos georreferenciados y coloreados según la clasificación del agua que se detalla en la Tabla 1. Este mapa permite identificar los sitios de calidad de agua excelente, buena, pobre, muy pobre y no apta para consumo humano, información útil para una mejor gestión de los recursos hídricos. La localización de los puntos con valores de Índice de Calidad de Agua superiores a 100, que incluye la clasificación de pobre hasta no apta para consumo humano, está dispersa por toda el área de estudio.

Cabe destacar que se encontraron pozos con aguas subterráneas de buena calidad (valores de ICA entre 50 y 100). Es importante identificar estos pozos que no están concentrados en una zona determinada, ya que pueden proveer agua de mejor calidad en una región donde el abastecimiento de agua subterránea es primordial por no contar con otras fuentes de provisión.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

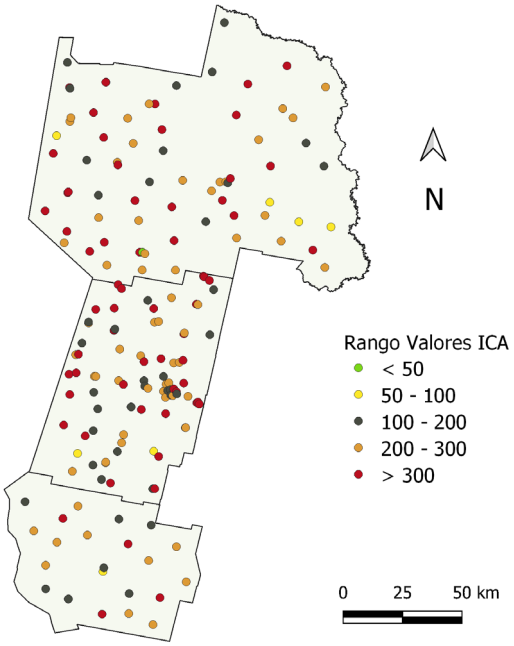


**Figura 3.** Mapa de la zona en estudio con las localizaciones de los pozos monitoreados, coloreados de acuerdo con la clasificación establecida

Cabe destacar que, hasta el momento, se han realizado avances significativos en la recopilación de datos fisicoquímicos, pero se ha identificado una carencia crucial en la ausencia de determinaciones bacteriológicas. Por esta razón, para la continuidad de este trabajo de investigación, se incluirán estos análisis con el fin de obtener una visión más completa y precisa de la calidad del agua.

## CONCLUSIONES

El cálculo del Índice de Calidad de Agua ha demostrado ser una herramienta eficaz que permite determinar la calidad del agua subterránea en distintos pozos de monitoreo, durante un periodo de tiempo específico.

El ICA demuestra que la calidad química del agua subterránea de la zona en estudio para consumo humano solo es aceptable en menos del 10% de los pozos monitoreados. En general, esto se debe a la alta concentración de arsénico y nitrato, contaminantes presentes en el área en estudio.

El mapa posibilita visualizar la localización de los pozos y la calidad del agua de cada uno de ellos. Estos datos conforman una información valiosa para individualizar las características del agua y actuar en consecuencia, ya sea respecto a la necesidad de


DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

realizar un tratamiento previo a su ingesta o para proveer a la población de agua de otras fuentes de abastecimiento.

La inclusión de análisis bacteriológicos en un próximo trabajo de investigación es esencial para obtener una comprensión completa y precisa de la calidad del agua. Esto permitirá tomar decisiones sobre su uso, especialmente en el caso del consumo humano, y garantizar la seguridad sanitaria de quienes la consuman. Abordar ambos aspectos contribuirá de manera significativa al conocimiento científico y al bienestar de la comunidad.

Es recomendable establecer un plan de monitoreo para los pozos de agua subterránea, el cual incluya mediciones sistemáticas de las variables presentes en el Índice de Calidad de agua, a fin de observar sus cambios a lo largo del tiempo. De esta manera, se podrá detectar tempranamente cualquier deterioro en la calidad del agua y aplicar medidas para mitigar sus efectos.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación a la publicación de este artículo.

## CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los autores contribuyeron en todas las etapas de elaboración del presente artículo.


DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

# REFERENCIAS

[1] Paris, M., Tujchneider, O., Pérez, M. y D´Elia, M. (2014). Protección de pozos de abastecimiento. Indicadores de la calidad del agua subterránea. *Tecnología y Ciencias del Agua, 5*(4), 5-22. doi: http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/448

[2] Smith, R., Knight, R. y Fendorf, S. (2018). Overpumping leads to California groundwater arsenic threat. *Nat Commun, 9*, 2089. doi: https://doi.org/10.1038/s41467-018-04475-3

[3] Gao, Y., Qian, H., Ren, W., Wang, H., Liu, F. y Yang, F. (2020). Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area. *Journal of cleaner production*, *260*, 121006. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006

[4] Silva, M.I., Gonçalves, A.M.L., Lopes, W.A., Lima, M.T.V., Costa, C.T.F., Paris, M., Firmino, P.R.A. y De Paula Filho, F.J. (2021) Assessment of groundwater quality in a Brazilian semiarid basin using an integration of GIS, w=vbnm,ter quality index and multivariate statistical techniques. *Journal of Hydrology, 598,* 126346. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126346

[5] Schwartz, F.W., Zhang, Y. y Ibaraki, M. (2019). What's next now that the boom in contaminant hydrogeology has busted? *Groundwater, 57*(2), 205-215. doi: https://doi.org/10.1111/gwat.12851

[6] Parrone, D., Ghergo, S., Frollini, E., Rossi, D. y Preziosi, E. (2020). Arsenic-fluoride co-contamination in groundwater: Background and anomalies in a volcanic-sedimentary aquifer in central Italy. *Journal of Geochemical Exploration, 217,* 106590. doi:https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106590

[7] Asadi, E., Isazadeh, M., Samadianfard, S., Firuz Ramli, M., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Hajnal, E. y Chau, K. (2020). Groundwater Quality Assessment for Sustainable Drinking and Irrigation. *Sustainability,12*(1), 177. doi: https://doi.org/10.3390/su12010177

[8] Soni, H.B. y S. Thomas (2014). Assessment of surface water quality in relation to water quality index of tropical lentic environment, Central Gujarat, India. *International Journal of Environment, 3*(1), 168-176. doi: https://doi.org/10.3126/ije.v3i1.9952

[9] Bretcan, P., Tanislav, D., Radulescu, C., Serban, G., Danielescu, S., Reid, M. y Dunea, D. (2022). Evaluation of Shallow Groundwater Quality at Regional Scales Using Adaptive Water Quality Indices. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(17), 10637. doi: https://doi.org/10.3390/ijerph191710637

[10] Horton, R. (1965). An Index Number System for Rating Water Quality. *Journal of Water Pollution Control Federation, 37*, 300-306

[11] Brown R.M., McClelland N.I., Deininger R.A. y Tozer R.G. (1970). A Water Quality Index — Do We Dare? *Water Sewage Works, 117*, 339–343

[12] Liou, S. M., Lo, S. L. y Hu, C. Y. (2003). Application of two-stage fuzzy set theory to river quality evaluation in Taiwan. *Water Research, 37*(6), 1406-1416. doi:https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00479-7

[13] Debels, P., Figueroa, R., Urrutia R. y Barra R. (2005). Evaluation of Water Quality in the Chillán River (Central Chile) Using Physicochemical Parameters and a Modified Water Quality Index. *Environmental Monitoring and Assessment, 110*(1-3), 301-322. doi:https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1

[14] Guillén, V., Teck, H., Kohlmann, B. y Yeomans, J. (2012). Microorganismos como bioindicadores de la Calidad del Agua. *Tierra tropical: sostenibilidad, ambiente y sociedad, 8*(1), 65-93

[15] Zhang, Q., Qian, H., Xu, P., Hou, K. y Yang, F. (2021). Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 212*, 111992. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111992

[16] Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K. y Liaghat, A. (2014). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Irán. *Environmental Earth Sciences, 71*(9), 3827-3843. doi: https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8

[17] El Baba, M., Kayastha, P., Huysmans, M. y De Smedt, F. (2020). Evaluation of the groundwater quality using the water quality index and geostatistical analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water, 12*(1), 262. doi: https://doi.org/10.3390/w12010262


**DOI:** https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

[18] Bundschuh, J., Nicolli, H., Blanco, M., Blarasin, M., Farías, S., Cumbal, L., Cornejo, L., Acarapi, J., Lienqueo, H., Arenas, M., Guerequiz, R., Bhattacharya, P., García, M., Quintanilla, J., Deschamps, E., Viola, Z, Castro de Esparza, M., Rodríguez, J., Pérez Carrera, A. y Cirelli, A. (2011). Distribución de arsénico en la región sudamericana. En J. Bundschuh, A. Pérez Carrera y M. Litter (Eds.), *Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamérica CYTED IBEROARSEN* (pp.148–149). CYTED.

[19] Nicolli, H., Bundschuh, J., Blanco, M., Tujchneider, O., Panarello, H., Dapeña, C. y Rusansky, J. (2012). Arsenic and associated trace-elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: results from 100 years of research. *The Science of the total environment, 429*, 36–56. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.048

[20] Litter, M. I., Ingallinella, A. M., Olmos, V., Savio, M., Difeo, G., Botto, L. y . . . Ahmad, A. (2019). Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination. *Science of the Total Environment, 676*, 756-766. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.262

[21] Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G. y Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha, 30*(4), 15-27. doi: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7436266

[22] Torres-Martínez, J. A., Mora, A., Knappett, P. S., Ornelas-Soto, N. y Mahlknecht, J. (2020). Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model. *Water Research, 182*, 115962. doi: https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115962

[23] Adimalla, N. (2020). Spatial distribution, exposure, and potential health risk assessment from nitrate in drinking water from semi-arid region of South India. *Human and ecological risk assessment: an international journal, 26*(2), 310-334. doi: https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1508329

[24] Petrabissi, H. y Sapino V. (2022). *Anuario meteorológico 2022*. Estación Agrometeorológica Experimental Agropecuaria Rafaela. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

[25] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos República Argentina. (1 enero, 2023). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022*. Censo 2022. https://censo.gob.ar/

[26] American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

[27] Código Alimentario Argentino, Artículo 982 (Resolución Conjunta SPRyRS y SAGPyA N° 68/2007 y N° 196/2019). (2019). https://www.argentina.gob.ar/anmat/codigoalimentario

[28] Boglione, R., Panigatti, M.C., Griffa, C., Schierano, M.C., Asforno, M. y Sapino, V. (2018). Predicción de la contaminación de aguas subterráneas aplicando ARC-GIS. *Libro Digital Distribución, Determinación y Remoción de Arsénico en Aguas* (pp.6-16). Edutecne. https://ria.utn.edu.ar/xmlui/handle/20.500.12272/4174

[29] Nazir, H. M., Hussain, I., Zafar, M. I., Ali, Z., y AbdEl-Salam, N. M.. (2016). Classification of Drinking Water Quality Index and Identification of Significant Factors. *Water Resources Management,* 30, 4233–4246. doi: https://doi.org/10.1007/s11269-016-1417-4

[30] Prasad, M., Sunitha, V., Reddy, Y. S., Suvarna, B., Reddy, B. M. y Reddy, M. R. (2019). Data on water quality index development for groundwater quality assessment from Obulavaripalli Mandal, YSR district, AP India. *Data in brief, 24*, 103846. doi: https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103846

[31] Verma, P., Singh, P.K., Sinha, R.R. y Tiwari, A.K. (2020). Assessment of groundwater quality status by using water quality index (WQI) and geographic information system (GIS) approaches: a case study of the Bokaro district, India. *Applied Water Science, 10*, 27. doi: https://doi.org/10.1007/s13201-019-1088-4

[32] Iriondo M. (2012). *Aguas Superficiales y Subterráneas de la Provincia de Santa Fe*. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino

[33] Todd, D. K. y Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons

[34] Organización Mundial de la Salud. (2007). Guías para la calidad del agua potable. *Biblioteca OMS, 1*(3), 1-398

[35] Kohn, J., Soto, D. X., Iwanyshyn, M., Olson, B., Kalischuk, A., Lorenz, K. y Hendry, M. J. (2016). Groundwater nitrate and chloride trends in an agriculture-intensive area in southern Alberta, Canada. *Water Quality Research Journal of Canadá, 51*(1), 47-59. doi: https://doi.org/10.2166/wqrjc.2015.132

 **DOI:** https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931

[36] Rodvang, S. J., Mikalson, D. M. y Ryan, M. C. (2004). Changes in ground water quality in an irrigated area of southern Alberta. *Journal of Environmental Quality, 33*, 476–487. doi: https://doi.org/10.2134/jeq2004.4760

[37] Haller, L., McCarthy, P., O'Brien, T., Riehle, J. y Stuhldreher, T. (2013). *Nitrate pollution of groundwater*. Alpha Water Systems INC

[38] Viers, J. H., Liptzin, D., Rosenstock, T. S., Jensen, V. B. y Hollander, A. D. (2012). *Nitrogen Sources and Loading to groundwater*. California State Water Resources Control Board

[39] Ren, C., Zhang, Q., Wang, H. y Wang, Y. (2021). Identification of Sources and Transformations of Nitrate in the Intense Human Activity Region of North China Using a Multi-Isotope and Bayesian Model. *International Journal of Environmental Research Public Health, 18*, 8642. doi: https://doi.org/10.3390/ijerph18168642

[40] Lorenz, K., Iwanyshyn, M., Olson, B., Kalischuk, A. y Pentland, J. (2014). *Livestock manure impacts on groundwater quality in Alberta: 2008 to 2011 Progress Report.* Alberta Agriculture and Rural Development.

[41] Menció, A., Mas-Pla, J., Otero, N., Regàs, O., Boy-Roura, M., Puig, R. y Folch, A. (2016). Nitrate pollution of groundwater; all right…, but nothing else? *Science of the total environment, 539*, 241-251. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.151

[42] Ceplecha, Z. L., Waskom, R. M., Bauder, T. A., Sharkoff, J.L. y Khosla, R. (2004). Vulnerability assessment of Colorado ground water to nitrate contamination. *Water, Air, Soil and Pollution, 159*, 373–394. doi: https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000049188.73506.c9

[43] Muñoz, H., Armienta, A., Vera, A. y Ceniceros, N. (2004). Nitrato en el agua subterránea del valle de Huamantla, Tlaxcala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 20*(3), 91-97. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020301

[44] Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., Macdonald, D.M.J., Nicolli, H.B., Barros, A.J., Tullio, J.O., Pearce, J.M. y Alonso, M.S. (2005). Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry, 20*(5), 989-1016. http://hdl.handle.net/20.500.12110/paper_08832927_v20_n5_p989_Smedley

[45] Tello, E.E. (1951). *Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE): sus manifestaciones clínicas*. Universidad Nacional de Córdoba.

[46] Tello, E.E. (1986). Arsenicismos hídricos: ¿qué es el hidroarsenicismo crónico regional endémico argentino (HACREA)? *Archivos Argentinos de Dermatología, 26*(4), 197-214.

 **DOI:** https://doi.org/10.18272/aci.v15i2.2931